SiC・GaN パワー半導体の 技術動向と応用展開

動向

筑波大学 岩室 憲幸 Iwamuro Noriyuki



新型コロナウイルスの蔓延がなかなか収束しな い現在、半導体不足が日増しに顕在化してきた。 この半導体不足の理由はいくつかあるが、大きな 理由の一つがCO。排出実質ゼロを目指した自動車 の電動化(xEV化)や再生可能エネルギー機器の 需要増による半導体需要の急拡大であると言われ ている。これにより最近ではパワーデバイスの需 給も逼迫していると言われている。今後は、コロ ナ禍で落ち込んだ自動車生産などの急回復を睨 み、パワーデバイスは需要拡大の新たな機会が巡 ってきそうな状況にある。最近発表されたある調 査会社の調査結果によると、パワーデバイス市場 は今後10年で約40%以上拡大する。ここに、次 世代パワーデバイスのSiC(炭化ケイ素:4H-SiC) /GaN(窒化ガリウム)が割り込んで需要の拡大を けん引したいところである。



(*)Si単結晶上にGaNエピ層は直接形成できない. GaNエピ形成にバッファ層(緩衡層)は必要

図1 SiCならびにGaNデバイス構造

数理物質系 教授 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

現在、これらSiCならびにGaNを用いたパワー デバイスがいよいよ市場に展開され始めてきた。 SiCやGaNは、エネルギーバンドギャップEg、 破壊電界強度Ecがシリコンに比べて極めて大き いのが特徴である。これらはシリコンの約10倍 の3 MV/cmという大きな破壊電界強度Ecを有す るため、同じ素子耐圧のシリコンパワーデバイス に比べて、素子耐圧を保持するドリフト層の厚さ を薄くすることができ、なおかつドリフト層の不 純物濃度を高く設計することができる。その結果、 ユニポーラデバイスでは電流導通時の抵抗(オン 抵抗)を、シリコンデバイスに対し理論上数百分 の1に低減することができる。またEgが大きいた めシリコンに比べ高温動作(高Tj動作)が可能と なる。

デバイス構造は、SiCデバイスが"SiC on SiC"、 つまりSiC基板上にドリフト層としてSiCエピタ キシャル層を成膜した基板に素子が作りこまれて いるのに対し、GaNデバイスは"GaN on シリコ ン"、シリコン基板上にGaNエピタキシャル層を 成膜した基板に素子が形成されている(図1参 照)。SiCデバイスは、現在のパワーデバイス市 場の主役であるシリコンMOSFETならびに IGBTと同様に縦型構造デバイスが実現でき、よ って耐圧1000 V以上、電流100 A以上の高電圧・ 大電流用途に適用が可能となる。これにより、例 えば電気自動車(EV)やプラグインハイブリッド 車(PHV)に搭載される50~100 kW程度の大容 量モータを制御するためのパワーコントロールユ

工業材料

ニット(PCU)内の、昇圧コンバータやインバー タ装置に、またはメガソーラ向け太陽光PCS装置 に適用されることとなる。一方、GaNデバイスは 縦型構造ではなく横型構造となるため、xEVの 高電圧電源をパワーウィンドやヘッドライトなど の補機用電源に変換する、比較的容量の小さい DC-DCコンバータなどに主に適用される。

最近の調査報告によれば、パワーデバイスの大 部分は今後10年にわたってもシリコンデバイス が占めており、例えば2030年では全パワーデバ イス市場に占めるシリコンデバイスの比率は90% 以上であると予測している¹⁾。本稿では、次世代 パワーデバイスとして大いに期待されている SiC/GaNパワーデバイスの最新技術動向、なら びにこれら素子適用拡大のための課題ならびに応 用展開について述べる。



1. SiC-MOSFETの特徴

SiCはそのエネルギーバンドギャップEgならび に熱伝導率がシリコンに比べ大きいことから、 200℃以上の高石化の設計が可能で、これによる 冷却部品の小型・軽量化が達成できると期待され ている。またSiCは化合物半導体材料の中でほぼ 唯一、イオン注入によってn型ならびにp型不純 物層を幅広い濃度範囲でかつ選択的に形成できる 半導体材料であり、さらにシリコン半導体で保護 膜材として活用されてきたシリコン酸化膜(SiO₂) を、比較的簡単に形成できるという特徴を有して いる。このことから、SiCを用いたMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)の 作製が可能となる。MOSFETはゲート電極が絶 縁膜であるSiO₂上に形成されており、このゲート 電極とSiO。、さらにはSiCで構成されるコンデン サ(MOS構造)に少量の電荷を充放電させること でスイッチング動作を行う。これにより、バイポ ーラトランジスタのように多くの電荷(電流)を供 給、または引き抜くことでオン・オフさせる素子 よりも、スイッチングに必要な駆動電力が極めて 小さくて済む、という特徴を有している。この結 果、駆動回路の小型化が可能となる。さらに MOSFETは、高ドレイン電圧印加時において、

ドレイン電流が増加せずに飽和するという特筆す べき特徴を有している。これにより、パワエレ装置 の異常動作時(たとえば、負荷短絡時)においても、 パワーデバイスに極めて大きな電流が導通するこ とによる素子瞬時破壊を避けることができ、保護 回路を付加することでパワエレ装置を壊すことな く、安全に停止することが可能となるのである²⁾。

SiC-MOSFETはシリコンIGBTに比べ、低オン 抵抗特性ならびに高速スイッチング特性を実現で き、その発生損失がシリコンIGBTの約60%以上 も低減できるとの報告もある。さらにSiC-MOS-FETは、その構造上の特徴からpinダイオードを 内蔵していることからインバータ回路適用の際に 外付けFWDが不要となるという特徴を有してお り、これらがシリコンIGBTに対する大きな勝ち 筋となってきた。しかしながら、現在のxEV用 駆動モータ向けインバータ用に新たに製品化され た逆導通IGBT(RC-IGBT)モジュールの登場³⁾や、 高放熱技術によるIGBTモジュールの高*Tj*化(175 ℃化)実現⁴⁾により、SiC-MOSFETモジュールの 勝ち筋が見えにくい状況にある。

SiC-MOSFETのパワエレ装置用途への最大の アピールポイントは、その低損失特性ならびに高 T動作実現による放熱フィンの小型化と、それ に伴うインバータ装置の小型・軽量化の実現にあ る。今後より一層の低損失化を目指すため SiC-MOSFETは、さらなる微細トランジスタセ ル構造を実現し低オン抵抗化が可能なトレンチ MOSFET構造が主流になると考えられる。さら に、この微細トレンチゲート構造による低オン抵 抗化の実現によりSiC-MOSFETチップ面積の縮 小化が可能となり、その結果SiCウェハ1枚から の素子取れ数増、かつ良品率向上によりMOS-FET 1素子当たりのコストの低減が可能となる。 SiC-MOSFET 普及拡大のための最大の課題はそ のコストダウンの実現にある。そのためには、 SiC基板自体のより一層の低コスト化が最も期待 されるところである。それに加え、SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)で培った6インチ化に よる量産技術と微細トレンチゲート構造という設 計技術から、この課題を解決しようとする動きが 活発となっている。





図3 1.2 kV SiCトレンチMOSFET断面構造例

2. 高性能化に向けたSiC-MOSFET素子技術

トレンチMOSFETはシリコンデバイスでも多 く開発されてきたが、SiCを使ってのトレンチ MOSFETの実現にはSiCデバイス特有の設計技 術が必要となる。これは、SiCがシリコンに比べ 約10倍の破壊電界強度Ecを有することから、た とえばMOSFETが順方向阻止状態、つまりゲー トオフ状態(Vgs = 0 V)でドレイン-ソース間に 素子耐圧に近い高電圧が印加された状態では、ト レンチゲート底部の薄いゲート酸化膜にシリコン パワーデバイスでは経験したことのないような大 きな電界が印加されることになる。図2に示す 解析によれば、SiC-MOSFETのゲート酸化膜に は約7.5 MV/cmという、SiO2酸化膜の破壊電界 強度の約75%に相当する大きな電界が印加され、 それによりゲート酸化膜破壊が生じやすくなる。 このため図3に示すように、トレンチゲート底 部、またはトレンチゲートよりも深い場所にp+ 層を設ける構造にして、ゲート酸化膜破壊を防止 する必要がある^{5)、6)}。これによりゲート酸化膜に 印加される電界を大きく低減することが可能とな り、その結果、SiCトレンチMOSFETの開発・ 製品化に成功した。これはSiCトレンチMOS-FET特有の設計技術であり、これにより低オン 抵抗で高信頼性特性を有する素子を実現したので ある。

今後は、SiC-MOSFET内蔵pinダイオードの順 方向特性劣化(Vf劣化)問題を、i)再結合促進層 (n+バッファ層)の導入⁷⁾、ii)バーンインスクリー ニング試験技術の確立⁸⁾やiii)ユニポーラデバイス デバイスであるSBDをFWDとして内蔵する^{9)、10)} ことで解決し信頼性の向上が一層図られ、より低 損失で高信頼性特性を有するSiC-MOSFETが実 現すると思われる。そしてこれら最先端 SiC-MOSFETが、次世代xEV用ならびに風力発 電や太陽光PCS、さらには一般産業用インバータ 回路などの新規パワエレ装置に、その適用範囲を 大きく広げていくであろう。